

高光谱遥感技术在城市绿地调查中的应用及发展趋势

Application and Development Trend of Hyperspectral Remote Sensing Technology in Urban Green Space Investigation

林勇 易扬 张桂莲* 张浪* 邢璐琪
LIN Yong Yi Yang ZHANG Guilian* ZHANG Lang* XING Luqi

基金项目:

国家重点研发计划“城市与区域生态环境决策支持系统与一体化管理模式”(编号: 2017YFC0505706)
上海市科委科研项目“上海‘四化’生态网络空间区划及其系统构建关键技术研究” (编号: 19DZ1203300)
上海市经济和信息化委员会信息化专项“基于融合感知的城市绿地智能监测与质量评估系统研制”(编号: 201901024)

文章编号: 1000-0283 (2020) 06-0070-06
DOI: 10.12193/j.laing.2020.06.0070.013
中图分类号: TU986
文献标识码: A
收稿日期: 2020-05-26

摘要

城市绿地是城市生态系统的重要组成部分, 探明城市绿地的动态变化和演变趋势对城市的发展至关重要。遥感技术以高效获取地面信息的优势, 在地面调查研究中得到广泛应用。高光谱属于遥感技术的一种, 以其极窄的电磁波段从地面获取地物连续光谱信息, 具有图谱合一和光谱分辨率极高的优势, 能为城市绿地精细化管理提供快速、准确和动态的信息。本文对高光谱的起源、发展、信息获取和处理技术进行了介绍, 探讨了高光谱遥感在城市绿地资源调查中的应用前景和发展趋势, 以期能为高光谱在城市绿地高效感知和实时监测中提供新的思路。

关键词

高光谱; 遥感; 城市绿地; 信息获取; 图像处理

林勇

1976年生/男/上海人/硕士/上海市园林科学规划研究院副院长, 高级工程师/研究方向为遥感与林业信息化(上海 200232)

张桂莲

1976年生/女/山西太原人/博士/上海市园林科学规划研究院碳中和中心副主任, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室高级工程师/研究方向为林业碳汇计量监测、城市绿地系统生态网络研究(上海 200232)

张浪

1964年生/男/安徽人/博士/教授级高级工程师、博士生导师/上海领军人才、享受国务院特殊津贴专家/上海市园林科学规划研究院院长, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心主任、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室主任/主要从事生态园林规划设计与技术研究/本刊主编(上海 200232)

Abstract

Urban green space is an integral part of the urban ecosystem. It proved that the dynamic changes and evolution trends of urban green space are crucial to the development of the city. Remote sensing technology has widely used in ground investigation and research because of its advantages in obtaining ground information efficiently. Meanwhile, hyperspectral is a kind of remote sensing technology. It collects continuous spectral information of ground features from the ground in an extremely narrow electromagnetic waveband. It has the advantages of the unification of maps and spectral resolution and can provide rapid, accurate, and dynamic management of urban green space exceptional management. This paper introduces the origin, development, information acquisition, and processing technology of hyperspectral. Moreover, it discusses the application prospects and development trends of hyperspectral remote sensing in urban green space resource survey. It also provides hyperspectral in the efficient perception and real-time monitoring of urban green space new ideas.

Key words

hyperspectral; remote sensing; urban green space; information acquisition; image processing

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: zgl@shsyky.com; z@shsyky.com

遥感 (Remote Sensing) 的概念始于美国地质学家布鲁特 (Puritt), 1962年美国密执安大学召开的环境科学专题讨论会上, 这一术语被正式采用。此后, 遥感技术在学术和科技界得到广泛研究与应用^[1-2]。高光谱遥感 (Hyperspectral Remote Sensing) 属于电磁波遥感技术中光学遥感的一种, 始于20世纪80年

代, 主要利用电磁波的可见光和红外波段来探测并获取目标信息^[3-4]。高光谱遥感不同于多光谱遥感和微波遥感, 它的光谱分辨率可达纳米级, 在可见光到红外波段, 其细分光谱通道数多达数十甚至数百个, 具有光谱波段密、波段连续、数据量大、光谱宽度窄等优势。高光谱遥感可进行地物的精确识别和分类、指示地物的地面特征、反演植被生长参数等, 目前在农业、林业、地质矿产、海洋等方面均有广泛的应用^[5-8]。

城市绿地 (Urban Green) 是城市生态系统的重要组成部分, 发挥着改善空气质量、缓解热岛效应、调节微气候和水文过程等生态功能, 促进居民身心健康。现有的城市绿地质和量的管理都依赖于传统的人工测量和样点测定数据, 缺乏区域尺度的、可智能化获取的精细数据。遥感技术因其实时、动态和覆盖范围广等优势, 在获取区域数据、研究城市绿地生态环境方面受到广泛关注^[9-10], 而高光谱遥感技术丰富的光谱信息对于城市绿地的精细分类、信息获取、变化监测、参数反演和质量监测等方面具有巨大潜力。

文章对高光谱的起源、高光谱遥感技术平台的发展、信息获取与传输方式进行了详细的介绍, 总结了当前遥感图像软件处理平台和常用技术 (包括光谱混合模型、端元个数估计、端元自动提取和光谱解混技术)。结合当前高光谱在地面调查中的应用, 文章还探讨了高光谱遥感在城市绿地资源调查中的应用前景以及发展趋势。提出了利用高光谱优势, 结合多源数据智能监测城市绿地动态变化及高效管理城市绿地的技术方案, 以期对未来城市绿地的高效感知和实时监测提供新的思路和方法, 为相关部门的决策提供科学参考。

1 高光谱成像光谱仪的发展

高光谱成像光谱仪可以根据搭载平台不同而分为航天高光谱成像光谱仪、航空高光谱成像光谱仪和地面高光谱成像光谱仪, 它们的工作波段主要在可见光波段和近红外波段等, 主要性能参数包括光谱分辨率、空间分辨率、瞬时视场和噪声反射率差等^[11]。国外最早的高光谱成像光谱仪 AIS-1, 由美国喷气实验室于 1983 年研制成功。我国最早的高光谱成像光谱仪 MAIS, 由中科院于 1989 年研发成功。20 世纪 90 年代, 我国陆续研发了推帚式成像光谱仪 (PHI)、新型模块化成像光谱仪 (OMIS) 和轻型高稳定度干涉成像光谱仪 (LASIS) 等。表 1 总结了国内外常见的高光谱成像光谱仪相关信息。

2 高光谱遥感信息获取与传输

高光谱遥感信息获取和传输系统是以卫星、机载或者地面为承载平台, 搭载高光谱遥感传感器设备, 可快速实时获取并传输数据的遥感监测系统^[12-13], 具有多功能、轻便、时效性强、信息损失少、智能和可视化等特点^[14-15], 高光谱成像仪获取到地物光谱反射率信息后, 借助高光谱数据处理系统可实现高光谱数据的可视化分析。对于星载高光谱传感器而言, 以电磁波形式记录的地面物体的辐射和反射信息传递给地面接收站后, 通过遥感数据传输系统以地面光纤网络传递到并进行数据处理和二次传输。机载高光谱传感器则是通过传输系统和串口获取数字图像, 后借助无线传输技术传达给地面接收器^[16]。

3 高光谱遥感数据处理

与传统遥感数据相比, 高光谱遥感数据具有波段多、光谱分辨率高、空间分辨率高等特点, 这使得高光谱遥感数据面临诸如混合像元、噪声干扰、数据冗余等问题, 因此, 除进行传统遥感数据预处理步骤外, 还应开展针对以上问题的高光谱数据处理, 包括混合像元分解、噪声消除、特征提取、降维运算、图像融合等。常用的高光谱遥感数据处理软件有 PCI、ENVI 和 ERDAS 等。

3.1 混合像元分解

遥感影像以像元为单位记录地面的辐射和反射信号, 由于高光谱遥感影像空间分辨率相对较低, 混合像元问题普遍存在于高光谱影像中, 因而需进行像元解混处理。常用的混合像元分解方法有光谱混合模型 (线性混合模型、随机混合模型和非线性混合模型)、端元个数估计 (NPD 算法和正交子空间投影法)、端元自动提取 (典型端元提取算法、空间信息辅助下的端元提取技术和基于粒子群优化的端元提取算法) 和光谱解混技术 (非监督分类算法和监督分类算法) 等^[10]。

3.2 噪声消除

高光谱遥感数据具有极窄的光谱宽度, 对地物的光谱特性及微小变化极其敏感, 因此, 高光谱成像仪在记录地面数据时, 既可有效获取目标地物的反射光谱信息。同时, 一些类似于地形因子、传感器本身、地物二向性反射等因素导致的干

表1 国内外主要高光谱成像光谱仪相关信息

成像方式	传感器	研发单位	启用年份	波段数
机载	AIS	美国喷气实验室	1983	128
机载	MAIS	中国科学院上海技术物理研究所	1989	71
机载	PROBE	美国探索气球科学公司	1998	128
机载	AVIRIS	美国国家航空航天局	1987	224
机载	CASI	加拿大国际研究公司	1990	288
机载	PHI	中国科学院上海技术物理研究所	20世纪90年代	244
机载	OMIS	中国科学院上海技术物理研究所	20世纪90年代	128
机载	AISA	芬兰光谱成像有限公司	1993	286
机载	AHI	美国夏威夷大学	1994	32/256
机载	DAIS	欧盟地球物理环境研究公司	1994	37/211
机载	HyDICE	美国海军研究实验室	1994	206
机载	HyMap	澳大利亚集或光电公司	1996	128
机载	LASH	美国海军	1997	48
机载	PHILLS	美国海军研究实验室	1999	500/1000
机载	FTVHSI	美国Kestrel公司	2000	145/256
机载	ASI VNIR	挪威光电科学院	2003	64/160
机载	SWIR	挪威光电科学院	2003	160/256
机载	APEX	欧洲空间局	2004	199/312
卫星	MODIS	美国喷气推进实验室	1999	36
卫星	PRISM	欧洲空间局	1999	204
卫星	FTHSI	美国空军研究室	2000	256
卫星	Hyperion	美国国家航空航天局	2000	220
卫星	Warfighter-1	美国轨道成像公司	2001	200
卫星	CHRIS	欧洲空间局	2001	18
卫星	MERIS	欧洲空间局	2002	15
卫星	COIS	美国海军研究实验室和空间技术发展公司	2002	210
卫星	GLI	日本宇宙开发事业团	2002	36
卫星	ARIES-1	澳大利亚空间有限公司	2005	64
卫星	嫦娥-1	中国空间技术研究院	2007	
卫星	HJ-1	——	2008	128
卫星	ARTEMIS	美国空军研究室	2009	>200
卫星	HSC-3	——	2011	61
卫星	EnMAP	——	2012	218
卫星	MSMI	——	2012	200
卫星	PRISMA	——	2012	249
卫星	HyspIRI	——	2014	200

扰信息，大气辐射传输效应带来的反射、辐射、照度、信息等噪声也将被记录。高光谱影像数据的辐射校正处理通过相应的反演系数对每个波段进行反演，得以获取目标辐射能量值，进而实现辐射噪声消除，以获得地物反射率、辐射率和地表温度等真实的物理参数^[17]。基于高光谱图像进行的目标探测可有效进行噪声消除，其主要依据感兴趣目标的反射光谱与其他地物的差异对目标进行特定的区分和提取，按是否需要先验知识，分为异常探测和光谱匹配两种方法^[18]。

3.3 特征提取和降维运算

光谱分辨率高的特点决定了高光谱遥感影像数据量大的事实，庞大的数据体量使得影像在处理和应用过程中计算难度增大、耗时增长；同时，相关研究表明，当训练样本数量有限时，存在最优特征维数，使分类精度达到最佳状态^[19]。因此，对高光谱影像进行特征提取和降维运算的研究与处理，可有效提取信息，摒弃冗余信息，有利于实现最优特征的选择与应用。常用的特征提取方法有基于类别可分性的特征提取、依类内类间距离准则的特征提取、依概率距离准则的特征提取和依信息熵准则的特征提取。常用的降维运算有主成分分析、噪声分离变换、卷积运算和独立成分分析等^[20]。

3.4 图像融合

通过对多源遥感影像的融合处理，可在保持光谱分辨率的基础上，实现空间分辨率的提升。目前，高光谱数据融合方法主要有以下三类：第一类为频域滤波方法，即将高光谱数据的低频信息与高空间分辨率的高频信息结合，如小波变换方法；第二类为利用概率统计方法结合高光谱和高空间分辨率数据之间的物理相关性实现优化拟合，如最大后验概率算法；第三类是基于混合光谱解混理论，利用高空间分辨率数据的空间信息，辅助高光谱解混得到高空间分辨率下的像元光谱^[21]。

4 高光谱遥感在城市绿地调查中的应用

4.1 城市绿地信息获取

城市绿地信息的获取主要基于实地资源调查与遥感技术手段的结合，通过在调查数据与遥感影像之间建立关系，实现城市绿地现状及变化等信息的获取。基于遥感影像进行城市

绿地分类时，植被类型丰富且光谱相似，光谱分辨率突出的高光谱数据能够更全面、细致的获取植被光谱特征及其差异，提高分类精度，实现变化监测，尤其在城市绿地树种分类、植被识别等精细尺度，相比与传统遥感数据具有明显的优势，Zhang等基于高光谱遥感数据建立植被特征库实现了植被的精细分类^[22]；董文雪等利用机载激光雷达和高光谱的方式对湖北省神农架的森林乔木物种多样性调查进行了精准且快速有效的监测^[23]。

基于高光谱遥感数据可进行城市绿地火灾防控，因高光谱遥感对温度具有强烈的敏感性，城市绿地着火点地表温度升高后，能够迅速确定发生火灾的准确范围和蔓延趋势^[19]。高光谱遥感还能准确判断出城市绿地的病虫害灾害，如通过对叶绿素浓度和叶片卷叶率的探测，可以快捷准确地获取到病虫害的发生区域及分布状态，从而制定相应的预警预报和治理方案。徐海舟运用三脚架和手持地物光谱仪采集高光谱影像，通过建立叶部主要病害胁迫下降香黄檀病情指数的高光谱反演模型，探讨了利用高光谱遥感监测降香黄檀叶部主要病害的方法^[24]。

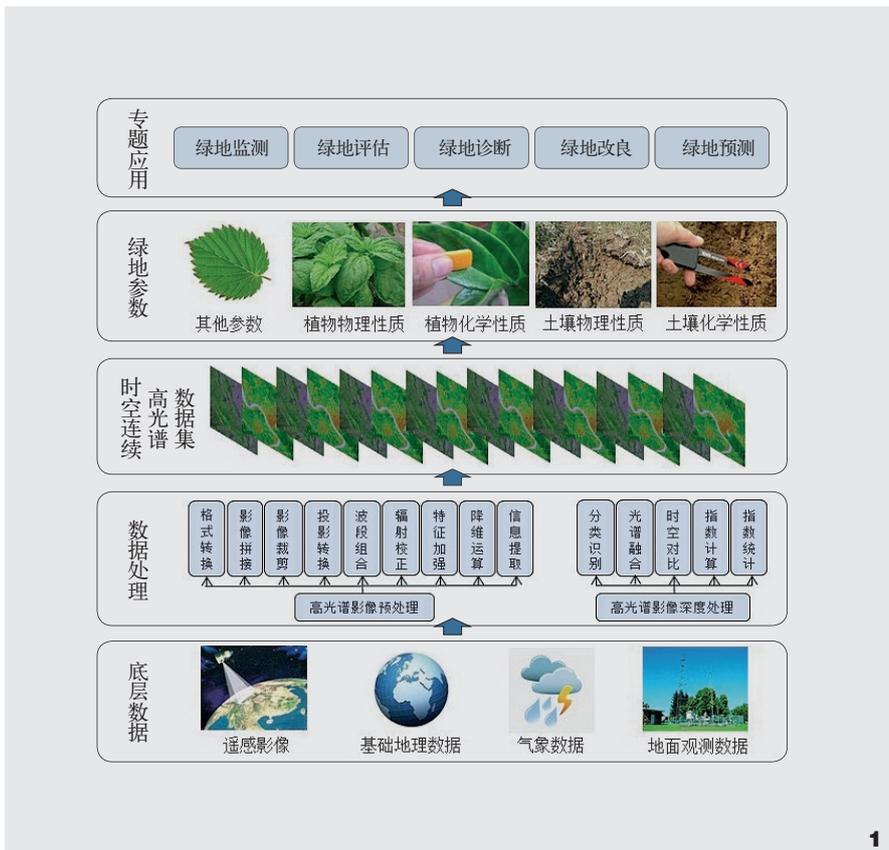
4.2 城市绿地参数反演

高光谱遥感因其光谱波段密、波段连续、数据量大、光谱宽度窄等优势，可获取更加细致的光谱信息，在城市绿地参数反演中应用广泛，如杨志青等选取北京市奥林匹克公园为研究区，采取地面固定多角度高光谱成像仪连续监测的方法，探讨了城市绿地生态系统光化学反射植被指数与光能利用率的关系^[25]；李喆等以高光谱数据为基础，识别对植被光合有效辐射吸收率（FAPAR）敏感的吸收峰，构建估算草地冠层水平FAPAR的高光谱吸收特诊参数模型^[26]。刘晓清和柳云龙利用土壤重金属在高光谱不同波段的反射率差异性，建立了重金属反演模型，为探测城市绿地的重金属含量提出了有效的方法和手段^[27]。多光谱遥感影像由于光谱分辨率较低，常常无法获取地物连续的波谱特征，而高光谱遥感影像较好地避免了这种误差。

5 高光谱遥感技术在城市绿地中的发展趋势

5.1 城市绿地智能监测技术方案构建

近年来，高光谱遥感在林业监测、病虫害防治和森林防火方面得到了广泛的应用^[10]。城市绿地作为城市生态系统的



1. 高光谱遥感技术智能监测城市绿地技术方案

重要组成部分，探明其时空变化和演变趋势，对于城市的合理规划 and 可持续发展具有重要意义。本文在借鉴高光谱遥感技术的优势，明确高光谱数据处理方法的基础上，结合城市绿地的发展需求，设计了利用高光谱，结合多源数据（气象数据、地面观测数据和其他数据）融合分析，从而达到智能管控城市绿地的技术方案。方案以期利用时空连续的高光谱数据和其他数据，经过预处理和计算后，建立高光谱特征（波段、纹理和空间）与地物（植被和土壤）的关系模型，为城市绿地的监测、评估、诊断、改良和预测提供新的方法（图1）。

5.2 发展趋势

高光谱遥感技术是观测地表植被强有力的工具，可以探测到在宽波段遥感中不能够探测到的物质特征，从而获取连

续的地物光谱图像，定量分析植被表层生物物理化学过程和参数，使城市绿地研究更为理想和准确，对城市的可持续发展起到较好的指导和推动作用^[2]。

未来高光谱遥感技术在城市绿地研究中的发展趋势：

(1) 结合多源遥感数据的城市绿地高光谱图像精细化分析。卫星高光谱遥感数据空间分辨率偏低，限制其实际应用效能，不同遥感数据具有各自的时间、空间和波谱特征，利用多源遥感数据可以实现不同数据的深度综合互补，是获得更全面和丰富的地表信息以及实现多源遥感数据价值的关键。在城市绿地资源调查中，一方面利用高光谱遥感数据能提供具有诊断意义的植被精细光谱信息，另一方面其他高空间分辨率的遥感数据，能准确定位植被具体位置，两者综合使用可实现城市绿地植物信息的精确提取和分类。

(2) 高光谱成像仪和激光雷达扫描仪等硬件设备的联合应用。将激光雷达和高光谱技术相结合, 利用激光雷达具有大气和水体的穿透能力以及高精度的测距与定位能力, 能完成多层次立体综合成像探测, 构建先进、高效和多层次的三维立体综合探测系统, 通过三维数字重建还原地物的三维几何形状。两者相结合, 能完成地面植物株数、位置、株高、胸径、冠幅和蓄积量等参数反演和模式识别。

(3) 人工智能技术与高光谱遥感技术的结合使用。高光谱图像能满足深度学习对数据量的要求, 丰富的数据有利于对植被的生物生化参量信息进行挖掘与探索, 从而提高模型识别及反演的精度。近年来, 常用人工智能学习方法(随机森林、神经网络和支持向量机等)建立高光谱与植物的关系, 并且算法也在逐步提升和改进, 使得反演结果精确程度越来越高。这种基于人工智能的信息自动获取、加工与提取技术, 具有方便、快捷和准确的特点, 使高光谱遥感技术更加快速广泛地应用于不同领域。■

参考文献

- [1] Dale P E R, Ritchie S A, Territo B M, et al. An Overview of Remote Sensing and GIS for Surveillance of Mosquito Vector Habitats and Risk Assessment[J]. *Journal of Vector Ecology*, 1998, 23(1): 54-61.
- [2] 倪金生, 蒋一军, 张富民. 遥感图像处理理论与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [3] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [4] Ghamisi P, Benediktsson J A, Ulfarsson M O. Spectral-spatial Classification of Hyperspectral Images based on Hidden Markovrandom Fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and RemoteSensing*, 2014, 52(5): 2565-2574.
- [5] 李波, 刘占宇, 黄敬峰, 等. 基于PCA和PNN的水稻病虫害高光谱识别[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(09): 143-147.
- [6] Yu H, Kong B, Wang G, et al. Prediction of Soil Properties Using a Hyperspectral Remote Sensing Method[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(4): 546-559.
- [7] Ishida T, Kurihara J, Viray F A, et al. A Novel Approach for Vegetation Classification Using UAV-based Hyperspectral Imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144: 80-85.
- [8] 黄健熙, 黄海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 144-156.
- [9] 孙琦, 郑小贤, 刘东兰. 高光谱遥感获取伐区调查数据的应用综述[J]. *林业资源管理*, 2006(05): 92-96.
- [10] 任鹏洲. 高光谱遥感技术在林业监测中的应用[J]. *中国战略新兴产业*, 2018(16): 132.
- [11] 杜培军, 夏俊士, 薛朝辉, 等. 高光谱遥感影像分类研究进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(2): 236-256.
- [12] 赵旦. 基于激光雷达和高光谱遥感的森林单木关键参数提取[D]. 中国林业科学研究院, 2012.
- [13] 曹琼, 马爱龙, 钟燕飞, 等. 高光谱—LiDAR 多级融合城区地表覆盖分类方法[J]. *遥感学报*, 2019(5): 892-903.
- [14] 张楠楠, 张晓, 姚娜, 等. 塔里木河流域上游胡杨叶面积指数高光谱遥感反演方法对比[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(08): 216-221.
- [15] 李军玲, 庞勇, 李增元, 等. 云阴影区机载高光谱影像森林树种分类[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(05): 136-141.
- [16] Grasmeyer J M, Keennon M T. Development of the Black Widow Micro Air Vehicle[J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 2001, 195: 519-535.
- [17] 康岩岩, 张爱武, 胡少兴, 等. 高光谱图像的JM变换自适应降维[J]. *遥感学报*, 2018, 24(1): 67-75.
- [18] Manolakis D, Truslow E, Pieper M, et al. Detection Algorithms in Hyperspectral Imaging Systems: An Overview of Practical Algorithms[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(1): 24-33.
- [19] 余旭初, 冯伍法, 杨国鹏, 等. 高光谱影像分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [20] 赵亮, 王立国, 刘丹凤. 高光谱图像子空间的波段选择[J]. *遥感学报*, 2019(5): 904-910.
- [21] 童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 689-707.
- [22] Zhang X., Sun Y, Shang K., et al. Crop Classification Based on Feature Band Set Construction and Object-oriented Approach Using Hyperspectral Images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(9): 4117-4128.
- [23] 董文雪, 曾源, 赵玉金, 等. 机载激光雷达及高光谱的森林乔木物种多样性遥感监测[J]. *遥感学报*, 2018, 22(05): 833-847.
- [24] 徐海舟. 高光谱遥感对降香黄檀叶部主要病害的监测研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [25] 杨志青, 陈报章, 查天山, 等. 城市绿地生态系统多角度高光谱光化学反射植被指数与光能利用率的关系[J]. *植物生态学报*, 2016(40): 1077-1089.
- [26] 李喆, 郭旭东, 古春, 等. 高光谱吸收特征参数反演草地光合有效辐射吸收率[J]. *遥感学报*, 2016, 20(2): 138-150.
- [27] 刘晓清, 柳云龙. 城市交通绿地土壤重金属含量的高光谱反演[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(05): 230-236.